

Centro Universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO
Curso de Engenharia Civil

ELDER ADRIANO FERREIRA
GUILHERME DE JESUS LIMA

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS ASFÁLTICOS COMO SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DE AGREGADOS DO CONCRETO**

Publicação Nº 01

Goianésia - GO
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, ELDER ADRIANO. LIMA, GUILHERME DE JESUS.

Análise do uso de Resíduos Asfálticos como substituição parcial de agregados do Concreto, 2025, 21P, 297 mm (ENC/UNIEGO, Bacharel, Engenharia Civil, 2025).

ARTIGO – UNIEGO – CENTRO UNIVERSITÁRIO EVANGÉLICO DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Civil.

1. Impactos Ambientais

2. Resistência

3. Sustentáveis

4. Viabilidade Técnica

I. ENC/UNIEGO

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, E. A. LIMA, G. J. Análise do uso de Resíduos Asfálticos como substituição parcial de agregados do Concreto. Artigo, Publicação 01 2025/1 Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO, Goianésia, GO, 21p. 2025.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Elder Adriano Ferreira, Guilherme de Jesus Lima

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise do uso de Resíduos Asfálticos como substituição parcial de agregados do Concreto.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2025

É concedida ao Centro Universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Elder Adriano Ferreira
Endereço: Rua 1A, Nova Aurora 3
CEP – 76385-355 – Goianésia/GO - Brasil

Guilherme de Jesus Lima
Endereço: Chácara Córrego do Teles
CEP – 76300-000 – Ceres/GO - Brasil

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO UNIEGO**

Aprovados por:

**Robson de Oliveira Félix, Mestre - UNIEGO
(ORIENTADOR)**

**Igor Cezar Silva Braga, Mestre - UNIEGO
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Eduardo Martins Toledo, Mestre - UNIEGO
(EXAMINADOR INTERNO)**

ANÁLISE DO USO DE RESÍDUOS ASFÁLTICOS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS DO CONCRETO

Elder Adriano Ferreira¹, Guilherme de Jesus Lima²
e Robson de Oliveira Félix³

¹Acadêmica de Engenharia Civil/UNIEGO Email: elder_diow@hotmail.com

²Acadêmico de Engenharia Civil /UNIEGO Email: guilhermejesus1290@gmail.com

³Orientador e Professor do Curso de Engenharia Civil/UNIEGO Email: robsonfelix.eng2014@hotmail.com

Resumo: A produção de concreto está entre as atividades que mais consomem recursos naturais e geram impactos ambientais na construção civil, principalmente devido à extração de agregados e à emissão de CO₂ durante a fabricação do cimento. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos, como o resíduo de pavimentação asfáltica (RPA), surge como alternativa sustentável para a produção de concretos mais ecológicos. Este estudo avalia os efeitos da substituição parcial de agregados naturais por RPA nas propriedades mecânicas do concreto. Foram elaborados traços com 0%, 20%, 40% e 60% de substituição de agregados miúdos e graúdos, de forma não simultânea, analisando-se a resistência à compressão aos 14 e 28 dias. Os resultados, processados por meio do *software* estatístico **Sisvar**, demonstraram que a substituição de até 20% apresenta desempenho satisfatório e viável para concretos de baixa responsabilidade estrutural, enquanto teores superiores reduzem significativamente a resistência devido à presença de ligante asfáltico e maior porosidade do material. Conclui-se que o uso controlado do RPA contribui para a sustentabilidade e redução do consumo de recursos naturais, sendo uma alternativa tecnicamente e ambientalmente viável.

Palavras-chave: Impactos ambientais; Resistência; Sisvar; Sustentáveis.

Abstract: Concrete production is among the activities that consume the most natural resources and generate significant environmental impacts in civil construction, mainly due to aggregate extraction and CO₂ emissions during cement manufacturing. In this context, the reuse of waste materials, such as reclaimed asphalt pavement (RAP), emerges as a sustainable alternative for producing more environmentally friendly concrete. This study evaluates the effects of partially replacing natural aggregates with RAP on the mechanical properties of concrete. Mix designs with 0%, 20%, 40%, and 60% replacement of fine and coarse aggregates, applied separately, were tested for compressive strength at 14 and 28 days. The results, processed using the **Sisvar** statistical software, showed that replacing up to 20% of natural aggregates provided satisfactory performance and was viable for non-structural concrete, while higher replacement levels significantly reduced strength due to the presence of asphalt binder and higher material porosity. It is concluded that the controlled use of RAP contributes to sustainability and reduces the consumption of natural resources, representing a technically and environmentally viable alternative.

Keywords: Environmental impacts; Strength; Sisvar; Sustainability.

INTRODUÇÃO

Historicamente, a competitividade na construção civil esteve atrelada a três aspectos fundamentais: qualidade, tempo e custo. A qualidade diz respeito à integridade da edificação, assegurando que a obra atenda aos padrões técnicos e de segurança estabelecidos; o tempo está relacionado à otimização dos processos de construção, visando a redução do prazo de entrega, e o custo envolve a busca por soluções econômicas que garantam o retorno rápido do investimento (Gantois, Lima, 2014). No entanto, com o avanço da consciência ambiental e a crescente demanda por soluções sustentáveis, um novo elemento passou a ser essencial para a competitividade do setor: a sustentabilidade. A necessidade de adotar práticas ecoeficientes tem impulsionado a busca por materiais reciclados e inovadores, especialmente no contexto do concreto, um dos materiais mais utilizados na construção

civil e responsável por grande parte dos impactos ambientais do setor (Santos *et al.*, 2020).

O concreto de cimento Portland é amplamente utilizado ao redor do mundo, sendo sua descoberta uma das mais marcantes na história. Para atingir a trabalhabilidade ideal do concreto, é necessário um processo de dosagem adequado, que busque a mistura mais eficiente e econômica entre os materiais que compõem o concreto (Tutikian, Helene, 2011).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON, 2009), o consumo médio mundial de concreto é de aproximadamente 1,9 toneladas por habitantes anualmente. Esse elevado consumo se justifica pela utilização do material em diversos setores da construção. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2015), através da NBR 12655, define o concreto como uma mistura de cimento, agregados miúdos e graúdos e água, podendo incluir outros elementos secundários, como aditivo e sílica ativa.

Além disso, Tutikian e Helene (2011), destacam a possibilidade de uso de materiais variados nos concretos, classificando-os entre agregados reciclados, artificiais ou industrializados, e naturais. O uso de materiais reciclados como a escória, pó de brita e resíduos de pavimentação asfáltica (RPA) são alternativas sustentáveis que visa a redução do consumo de recursos naturais, bem como o reaproveitamento de resíduos sem destinação.

A reutilização de RPA tem se expandido progressivamente e, em alguns países, já representa a principal fonte de agregados. Segundo Correa (2009), o aumento do uso de agregados reciclados está diretamente relacionado às restrições ambientais que limitam a extração de agregados naturais, conforme as normas vigentes para sua aplicação. Assim, a incorporação desses resíduos na construção civil contribui para a preservação ambiental, promovendo uma indústria mais sustentável e reduzindo a necessidade de exploração de recursos naturais.

Dentre os principais estudos de alternativas sustentáveis para a composição de materiais de construção civil, Souza (2007) destaca o uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e os oriundos de processos metalúrgicos, no entanto, o uso de resíduos de pavimento asfáltico (RPA) no concreto ainda é um campo pouco explorado, apesar de esses resíduos serem classificados como materiais recicláveis ou reutilizáveis, podendo ser utilizados como agregados. Esses resíduos provenientes de pavimentação são classificados como classe A, conforme a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA (BRASIL, 2002).

A utilização do RPA no concreto permite destinar o material de maneira ecologicamente responsável, além de agregar valor ao produto. No entanto, como afirma Pera (1996), para que um material seja aceito no mercado sem restrições, é fundamental compreender detalhadamente seu desempenho físico, químico e seu potencial de aplicação. No caso dos resíduos, é também necessário avaliar os possíveis impactos que possam surgir durante o processo de beneficiamento.

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da substituição de agregados naturais por agregados reciclados de resíduos de pavimento asfáltico nas propriedades mecânicas do concreto, tanto na fase fresca quanto endurecida. Para isso, foi realizado testes de compressão em corpos de prova aos 14 e 28 dias para avaliação da resistência a compressão do concreto, com diferentes proporções de misturas de RPA em substituição ao agregado miúdo e graúdo, verificando, mediante estatística, a diferença entre os tratamentos produzidos.

REFERENCIAL TEORICO

A sustentabilidade é um conceito essencial que tem ganhado enorme relevância nas últimas décadas, refletindo a necessidade de equilibrar o desenvolvimento humano com a preservação dos recursos naturais. Trata-se de uma abordagem que busca atender às necessidades do presente sem comprometer as capacidades das gerações futuras. A exploração excessiva dos recursos naturais e o crescimento econômico desenfreado têm levado a graves consequências ambientais, como a mudança climática, a perda de biodiversidade e a escassez de recursos. Portanto, a sustentabilidade envolve não apenas o cuidado com o meio ambiente, mas também a criação de modelos que assegurem a preservação dos recursos naturais a longo prazo (Póvoas, 2015). O pilar ambiental enfatiza a importância de reduzir emissões e resíduos, gerir água e energia de forma consciente de forma a respeitar os limites naturais do planeta (Schorr, Rogério & Cenci, 2015).

Na construção civil, o concreto é um dos materiais mais prevalentes, seja em obras de infraestrutura, edificações e projetos de saneamento básico, no entanto, a sua produção, especialmente a do cimento, está associada a impactos ambientais consideráveis. A fabricação de cimento contribui com cerca de 5-7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa (Mehta, Monteiro, 2014). O concreto é um material compósito, constituído essencialmente, por cimento Portland, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), água e, quando necessário, aditivos

químicos ou minerais que visam aprimorar suas propriedades no estado fresco ou endurecido, devem seguir as diretrizes estabelecidas por normas como NBR 6118:2023 e NBR 12655:2015 (ABNT, 2015; 2023).

Os agregados desempenham um papel importante nas propriedades mecânicas do concreto. Hernández (2021) destaca a necessidade de observar propriedades como forma, textura superficial, resistência, absorção de água e composição química dos agregados. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019), a composição granulométrica dos agregados é fundamental para a qualidade do concreto, afetando aspectos como trabalhabilidade, compacidade e resistência mecânica.

Com o aumento da preocupação ambiental, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados tem sido cada vez mais explorada. Parrales Espinales *et al.* (2022) demonstram que é possível substituir até 50% dos agregados naturais por reciclados sem comprometer significativamente a resistência mecânica do concreto, desde que haja um controle rigoroso sobre as propriedades dos materiais reaproveitados. Essa prática contribui para a redução do impacto ambiental, diminuição da extração de recursos naturais e reaproveitamento de resíduos da construção civil.

Outro aspecto relevante é a absorção de água pelos agregados, que pode afetar o teor de água efetivo da mistura e, por consequência, a hidratação do cimento. Agregados de alta absorção demandam ajustes na relação água/cimento. Segundo Solís, Moreno e Arjona (2012), o uso de agregados porosos exige planejamento técnico adequado para se evitar concretos com baixa resistência ou durabilidade reduzida. Desta forma, a caracterização adequada dos agregados é essencial para um desempenho significativo e vida útil das estruturas em concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

O resíduo de pavimentação asfáltica (RPA), também conhecido internacionalmente como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), é o material resultante da remoção ou fresagem de camadas de pavimento asfálticos deteriorados ou obsoletos. Trata-se de um composto

granular, formado por uma mistura de agregados minerais revestidos por ligante betuminoso, geralmente cimento asfáltico de petróleo (CAP). Esses resíduos, quando corretamente processado e reaproveitado, preserva parte das propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais originais, o que o torna apto para reutilização tanto em novas misturas asfálticas quanto em outros segmentos da construção civil, como a produção de concreto (Yang *et al.*, 2023; Angiolini *et al.*, 2024).

O reaproveitamento do RPA representa uma prática sustentável, pois contribui significativamente para a redução do consumo de recursos naturais, como brita e areia, além disso a reutilização do RPA evita o descarte inadequado desse material em aterros ou áreas ambientalmente sensíveis, promovendo o reaproveitamento de resíduos e alinhando-se aos princípios da economia circular e da gestão ambiental responsável (Santos *et al.*, 2023).

Diversos estudos vêm analisando o uso de RPA como substituto parcial dos agregados graúdos naturais na produção de concreto. A sua utilização, no entanto, exige cuidados específicos, uma vez que o material apresenta características distintas, como maior porosidade, maior absorção de água e presença de resíduos betuminosos, o que pode afetar a aderência da pasta de cimento e a resistência à compressão. Rocha *et al.* (2021), observaram que, quando utilizado em dosagens adequadas e com controle tecnológico rigoroso, o RPA pode ser incorporado ao concreto sem comprometer seu desempenho mecânico. Os resultados obtidos por esses autores indicam que a substituição parcial de agregados naturais por RPA é viável e contribui para a sustentabilidade da construção, desde que os parâmetros técnicos sejam devidamente respeitados.

A utilização do RPA em obras civis contribui para práticas construtivas, mas eficientes e limpas, promovendo redução de recursos naturais e valorização dos resíduos (Angiolini *et al.* 2024). No entanto, sua comprovação de uso depende de estudos experimentais confiáveis e rigorosos, que avaliem o desempenho do material em diferentes dosagens e situações de uso.

Nesse sentido, a estatística se apresenta como um instrumento fundamental, pois permite analisar dados com precisão e embasar decisões técnicas de forma objetiva. Essa ciência é dividida em duas vertentes principais: a estatística descritiva, que organiza e resume informações por meio de gráficos, tabelas e medidas de tendência central e dispersão; e a estatística inferencial, que utiliza métodos probabilísticos para extrapolar os resultados obtidos em uma amostra para toda a população, permitindo estimativas e testes de hipóteses com base científica (Triola, 2017).

Na engenharia civil, o uso dessa ferramenta é fundamental para análise de desempenho de materiais, controle técnico e de produtividade (Dias *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2021). Com o avanço tecnológico, a estatística tornou-se mais acessível, permitindo análises mais complexas e tomadas de decisões mais ajustadas (Morettin e Bussab, 2017).

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do concreto produzido com a substituição parcial dos agregados graúdo e miúdo naturais por resíduo de pavimentação asfáltica (RPA). As substituições foram realizadas em três proporções: 20%, 40% e 60%, em massa, tanto para o agregado graúdo quanto para miúdo, mantendo-se constante o volume total de agregados. Para a comparação, foi moldado também um traço de referência, com 0% de RPA.

A metodologia adotada seguiu as diretrizes da ABNT NBR 5738:2021, que trata da moldagem e cura de corpos de prova de concreto, além das recomendações da NBR 7211:2019 (Agregados para concreto) e NBR 5739:2018 (Ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos).

Inicialmente, o RPA foi coletado de trecho de pavimento previamente fresado da BR 153 – Viaduto Trincheira localizado na cidade de Anápolis - GO, fornecido pela empresa Mobicon Construtora conforme a Figura 1.

Figura 1 – RPA



Fonte: Próprios autores, 2025.

O material foi seco, britado e peneirado de forma a atender às faixas granulométricas compatíveis com as dos agregados graúdo e miúdo convencionais. Em seguida, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados (massa específica, absorção, granulometria e teor de betume residual).

Inicialmente, foi conduzida a análise granulométrica da areia, utilizando o conjunto de peneiras normalizadas conforme a NBR NM 248:2003. As amostras foram submetidas à peneiramento, e os resultados permitiram o cálculo do módulo de finura (MF) e a verificação da adequação do agregado miúdo à zona utilizável prevista pela NBR 7211:2019. O agregado apresentou módulo de finura compatível com os limites normativos, garantindo sua aplicabilidade na produção do concreto. Para o agregado graúdo (brita 1), foi determinada a distribuição granulométrica com base na NBR NM 248:2003, comparando-se os percentuais de passante obtidos com os limites mínimo e máximo estabelecidos pela NBR 7211:2019. A curva granulométrica mostrou-se dentro da faixa especificada, confirmando a adequação do material para utilização em concretos estruturais.

Em seguida, realizou-se a determinação do teor de umidade dos agregados, procedimento normatizado pela NBR 9776:1987. Amostras de areia e brita foram pesadas no estado úmido e posteriormente secas em estufa a 105° C, possibilitando o cálculo da umidade natural. Esse ensaio foi fundamental para corrigir a relação água/cimento e garantir maior precisão na dosagem do concreto.

Foi também determinado o ensaio de massa unitária dos agregados segundo a NBR NM 45:2006, com o objetivo de avaliar a densidade aparente do material no estado solto. O ensaio consistiu no preenchimento de um recipiente de volume conhecido com o agregado, seguido da pesagem. Foram realizadas três determinações para cada agregado, calculando-se a média e o valor seco correspondente, a fim de reduzir a influência da umidade.

A massa específica do agregado graúdo (brita) foi determinada de acordo com a NBR NM 53:2009, que estabelece o procedimento para cálculo da massa específica aparente e real do agregado graúdo. Para o agregado miúdo, a massa específica foi obtida pelo método do frasco de Chapman, conforme a NBR NM 52:2009, sendo considerada a relação entre a massa da amostra seca e o volume deslocado no frasco. Esses ensaios forneceram dados essenciais para a correta dosagem do traço de concreto.

Adicionalmente, foi realizado o ensaio de inchamento da areia, em conformidade com a NBR 6467:2009, visando identificar a variação volumétrica do agregado miúdo em função de sua umidade. O ensaio consistiu na medição do volume da areia em condição seca/natural e posteriormente com adição de água, obtendo-se o percentual de inchamento. Este parâmetro é relevante para ajuste da quantidade de agregado miúdo na dosagem, evitando alterações indesejadas na trabalhabilidade do concreto.

No laboratório da Engtec, situado na cidade de Anápolis-GO, foi realizado o ensaio de determinação do teor de ligante betuminoso residual presente no material fresado (RPA), com a finalidade de quantificar a porcentagem de asfalto retida no resíduo e analisar sua influência sobre a aderência e a trabalhabilidade do concreto. O procedimento seguiu integralmente as recomendações do método Marshall (DNER-ME 043/95), amplamente reconhecido e empregado no controle tecnológico de misturas asfálticas. No mesmo laboratório foram executados, para o RPA, os ensaios de massa específica e massa unitária, enquanto os ensaios de

granulometria foram conduzidos diretamente pelos autores, assegurando maior confiabilidade na caracterização física do material reciclado. A determinação do ligante consistiu na extração e quantificação do CAP residual por meio da diferença de massa entre as amostras com e sem asfalto, possibilitando calcular o teor médio de betume presente no resíduo. Os resultados obtidos indicaram valores próximos de 4%, faixa considerada típica para materiais fresados, cuja determinação é essencial para ajustar corretamente a dosagem do concreto, uma vez que o ligante residual pode influenciar a absorção de água e a aderência entre a pasta cimentícia e o agregado reciclado, conforme apontado por Athayde (2018).

Para o F_{ck} de 25 MPa, a composição do traço base foi definida por meio do método ABCP/IBRACON, sendo 1:2:3, com relação água/cimento de 0,63, cimento CP II-Z 32, agregado miúdo (areia média natural) e agregado graúdo britado 1. Para cada variação de substituição (20%, 40% e 60%), o RPA substituiu proporcionalmente os agregados naturais (miúdo e/ou graúdo), mantendo-se as demais proporções constantes. A substituição dos agregados não é simultânea, ou seja, as proporções citadas são para alteração inicialmente do agregado miúdo, e após a moldagem dos corpos de prova, é repetido o processo com a substituição do agregado graúdo para novas análises.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm, em número de seis unidades para cada traço e para cada idade de ensaio (14 e 28 dias), considerando-se os percentuais de substituição de 0%, 20%, 40% e 60% de RPA. O concreto foi lançado em três camadas no molde, com adensamento realizado por meio de 25 golpes de haste metálica em cada camada, conforme estabelece a NBR 5738:2021. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em ambiente protegido por 24 horas e, em seguida, foram desmoldados e submetidos à cura em tanque com água à temperatura de (23 ± 2) °C.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, nas idades de 14 e 28 dias de idade no Instituto Federal da cidade de Trindade -

GO, conforme procedimento descrito na ABNT NBR 5739:2018.

Para a validação dos resultados, foi aplicada análise estatística para verificar se as diferenças observadas entre os teores de substituição por RPA representam efeitos reais sobre a resistência à compressão ou apenas flutuações aleatórias do processo experimental.

Os tratamentos foram organizados em um esquema fatorial 7×2 , composto por sete níveis de substituição dos agregados naturais por RPA (testemunha, A20, A40, A60, B20, B40 e B60) e duas idades de cura (14 e 28 dias), totalizando 14 tratamentos, cada um com 6 repetições, ou seja, 84 amostras produzidas. Essa estrutura permitiu avaliar simultaneamente o efeito de cada dose de substituição e do tempo de cura sobre a resistência à compressão do concreto. A nomenclatura adotada para cada tratamento é apresentada na Tabela 1, sendo fundamental para a organização dos dados e para a compreensão das variáveis analisadas ao longo do estudo.

Tabela 1 – Composição dos tratamentos e tempo de cura para ensaio

Tratam. (abrev.)	Composição	Tempo (dias)
T-14	Traço testemunha sem substituição	14
A20-14	Substituição 20% de areia por RPA	14
A40-14	Substituição 40% de areia por RPA	14
A60-14	Substituição 60% de areia por RPA	14
B20-14	Substituição 20% de brita por RPA	14
B40-14	Substituição 40% de brita por RPA	14
B60-14	Substituição 60% de brita por RPA	14
T-28	Traço testemunha sem substituição	28
A20-28	Substituição 20% de areia por RPA	28
A40-28	Substituição 40% de areia por RPA	28
A60-28	Substituição 60% de areia por RPA	28
B20-28	Substituição 20% de brita por RPA	28
B40-28	Substituição 40% de brita por RPA	28
B60-28	Substituição 60% de brita por RPA	28

Fonte: Próprios autores,2025

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e analisadas estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando o software Sisvar conforme a Figura 2.

Figura 2 – Software Sisvar



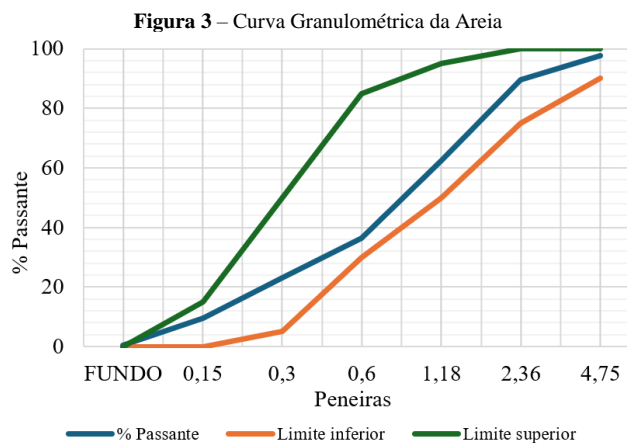
Fonte: Próprios autores,2025

Para a comparação entre os tratamentos, foi utilizado o teste de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância, que tem por objetivo identificar diferenças significativas entre os grupos testados em cada idade de ruptura, permitindo avaliar o impacto das diferentes proporções de RPA sobre a resistência do concreto ao longo do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados experimentais obtidos ao longo da pesquisa são apresentados e analisados a seguir, incluindo a caracterização física dos materiais e o desempenho mecânico dos concretos produzidos. As figuras e tabelas incorporadas nesta etapa contêm informações fundamentais para a interpretação dos efeitos causados pelo uso do RPA em diferentes teores de substituição.

A interpretação dos resultados inicia-se pela caracterização dos materiais, etapa essencial para entender de que forma suas propriedades interferem no comportamento mecânico do concreto. Os dados obtidos para granulometria, índices físicos e teor de ligante do RPA fornecem suporte para a compreensão das variações observadas nas resistências, já que estas características condicionam a trabalhabilidade, a porosidade e a capacidade de aderência da mistura.



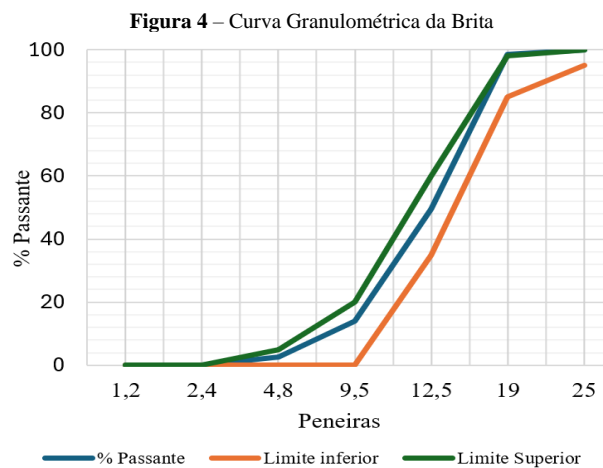
Fonte: Próprios autores, 2025

Conforme a Figura 3, observa-se que a areia analisada apresenta distribuição de partículas bem distribuída e dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211:2019. O percentual passante acumulado demonstra comportamento progressivo e coerente com um agregado miúdo de zona utilizável, sem concentrações excessivas de material fino ou grosso. A fração de 1,18 mm representou a maior retenção (27,05%), seguida pela peneira de 0,6 mm (26,05%), indicando boa graduação intermediária e contribuindo para adequada compacidade. Dessa forma, a areia utilizada está conforme os requisitos normativos e adequada para uso na produção do concreto.

A ausência de retenções abruptas e a continuidade da curva confirmam que o agregado miúdo apresenta módulo de finura compatível com a zona recomendada pela NBR 7211:2019. Além disso, o percentual passante final (23,21% na peneira de 0,3 mm) mostra que não há excesso de partículas muito finas, condição que poderia aumentar a demanda de água e prejudicar a trabalhabilidade. Assim, os resultados evidenciam que o material possui comportamento granulométrico equilibrado, sendo considerado apto para aplicação em concretos convencionais (Souza, 2021).

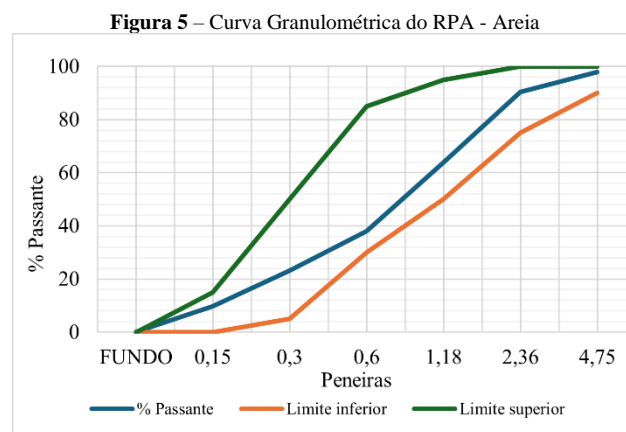
A Figura 4 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo natural. Observa-se que a brita 1 apresenta distribuição de tamanhos de partículas dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211:2019 para agregados graúdos destinados à produção de concreto. A predominância de partículas entre 9,5 mm e 19,0 mm

indica granulometria adequada para promover boa compactação, reduzindo vazios e contribuindo para maior resistência mecânica da matriz, conforme descrito por Yu (2022). Dessa forma, o agregado graúdo natural utilizado está em conformidade com a norma e adequado ao emprego no concreto de referência.

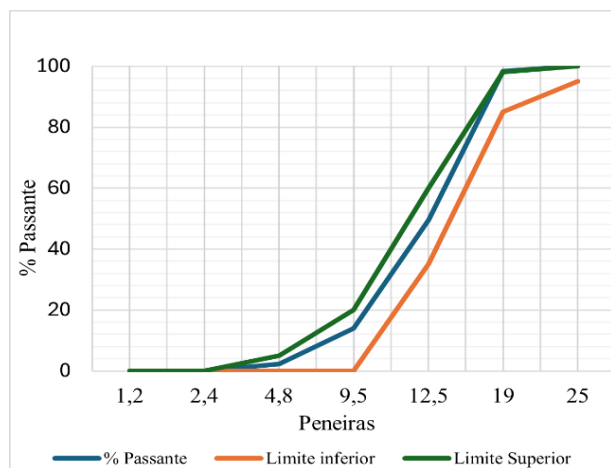


Fonte: Próprios autores, 2025

As curvas granulométricas do resíduo de pavimentação asfáltica (RPA), apresentadas nas Figuras 5 e 6, evidenciam um comportamento característico de materiais fresados, com maior dispersão de tamanho e partículas finas em comparação aos agregados naturais. Ainda que o material apresente particularidades decorrentes da presença de ligante betuminoso aderido e do desgaste promovido pela fresagem, observa-se que suas curvas se mantiveram em grande parte, dentro das zonas utilizáveis para fins de incorporação em misturas cimentícias.



Fonte: Engetec adaptado ,2025

Figura 6 – Curva Granulométrica do RPA – Brita

Fonte: Engetec adaptado, 2025

A análise do teor de ligante betuminoso residual revelou valor médio próximo de 4% e 3,7% conforme a Tabela 2, faixa considerada típica para materiais fresados. A presença deste ligante influencia diretamente a interface entre agregado e pasta cimentícia, reduzindo a aderência e aumentando a tendência à formação de zonas frágeis no concreto. Ainda que não exista limite normativo específico para teor de ligante em RPA utilizado como agregado reciclado, a presença do betume exige controle no teor de substituição. Portanto, em termos normativos, é necessário cautela no uso desse material, mas é tecnicamente viável dentro de substituições moderadas.

Tabela 2 – Teor de Asfalto para Granulometria de Areia e Brita

Amostra	Areia	Brita
massa total	686,7 g	688,1 g
massa sem asfalto	659,6 g	662,7 g
massa do asfalto	27,1 g	25,4 g
Teor de asfalto	4,0 %	3,7 %

Fonte: Engetec adaptado, 2025

Os resultados de teor de umidade apresentados para a areia, brita e RPA mostram valores compatíveis com o comportamento esperado para cada material. A areia apresentou umidade dentro da faixa de 0,1% a 2%, considerada adequada para concretos convencionais. A brita apresentou baixos valores de umidade, comportamento esperado para agregados graúdos. Já o RPA apresentou umidade maior que os agregados naturais

conforme Tabela 3, refletindo sua maior porosidade e presença de ligante. Com base nos critérios da NBR 12655, todos os agregados possuem teor de umidade para utilização em concretos aceitáveis, desde que a umidade seja corrigida na dosagem conforme foi realizado.

Tabela 3 – Teor de Umidade

Material	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)
Areia	1000	998,8	0,12
Brita	2000	1986,8	0,66
RPA	1000	992,5	0,75

Fonte: Engetec, adaptado pelos autores, 2025

Os ensaios de massa unitária conforme Tabela 4 apontaram valores típicos para a areia e brita natural, dentro das faixas indicadas pela NBR NM 45:2006. A brita apresentou massa unitária compatível com materiais de granulometria regular e baixa porosidade, enquanto a areia apresentou comportamento adequado às condições de umidade verificadas. O RPA, por sua vez, apresentou massa unitária inferior aos agregados naturais, evidenciando sua maior porosidade e menor densidade aparente. Embora esse comportamento seja esperado para materiais fresados, não há enquadramento pleno nas faixas convencionais para agregados naturais.

Tabela 4 – Massa Unitária

Materiais	Areia	Brita	RPA Areia	RPA Brita
Volume Medido (dm ³)	15,00	20,00	15,00	20,00
Volume Exigido NBR (dm ³)	15,00	20,00	15,00	20,00
Conformidade de Volume	OK	OK	OK	OK
Média MU (kg/dm ³)	1,499	1,426	1,350	1,300
MU Seca Média (kg/dm ³)	1,497	1,416	1,330	1,280

Fonte: Próprios autores, 2025

A determinação da massa específica dos agregados naturais mostrou valores compatíveis com o

comportamento esperado para materiais de boa qualidade. A areia natural, ensaiada pelo frasco de Chapman (NBR NM 52), apresentou massa específica de 2,62 g/cm³, enquadrando-se na faixa típica de referência para areias silicosas (2,55 a 2,70 g/cm³). A brita 1, por sua vez, apresentou massa específica seca de 2,491 g/cm³, massa específica SSD de 2,516 g/cm³ e massa específica aparente de 2,554 g/cm³, com absorção de água de 0,99%, evidenciando um agregado graúdo de baixa porosidade e boa qualidade. Considerando a maior porosidade e a presença de ligante betuminoso aderido às partículas do resíduo de pavimentação asfáltica (RPA), admite-se neste estudo uma massa específica de 2,38 g/cm³ para o RPA, valor ligeiramente inferior ao dos agregados naturais, o que é coerente com seu comportamento mais leve e poroso. A Tabela 5 reúne os resultados obtidos para a areia e a brita, bem como os valores estimados para o RPA.

Tabela 5 – Massa Específica

Material	Areia	Brita	RPA
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,59	2,49	2,35
Massa Específica SSD (g/cm ³)	2,62	2,52	2,38
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,66	2,55	2,42
Absorção de água (%)	1,10	0,99	1,5

Fonte: Próprios autores, 2025

O ensaio de inchamento da areia, realizado conforme os procedimentos da NBR 6467, permitiu avaliar a variação volumétrica do agregado miúdo em condição úmida. A areia apresentou volume seco (H1) de 710 ml e volume úmido (H2) de 875 ml, resultando em um inchamento de 23,24%. Esse valor encontra-se dentro da faixa típica de 15% a 25% usualmente observada para areias de granulometria média, indicando comportamento adequado e compatível com materiais silicosos de boa qualidade. A classificação da areia como média reforça a coerência do resultado obtido, uma vez que areias dessa classe tendem a apresentar inchamento significativo quando umedecidas. A Tabela 6 sintetiza os valores

determinados e sua conformidade com a faixa recomendada pela literatura e pela norma.

Tabela 6 – Ensaio de Inchamento da Areia – NBR 6467

Parâmetro	Valor
Volume seco (ml)	710
Volume Úmido (ml)	875
Inchamento (%)	23,24
Classe da Areia	Média
Faixa Típica de Inchamento	15% - 25%
Conformidade	Dentro da faixa

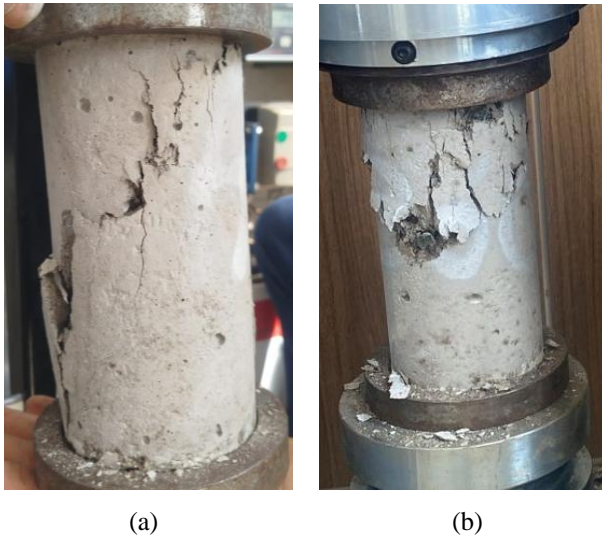
Fonte: Próprios autores, 2025

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão demonstram de forma clara a influência da substituição parcial dos agregados naturais pelo Resíduo de Pavimentação Asfáltica (RPA) nas propriedades mecânicas do concreto. A Tabela 7 apresenta as médias dos valores de resistência à compressão obtidas para cada traço nos períodos de 14 e 28 dias de cura, permitindo comparar o desempenho do traço de referência (testemunha) com os diferentes percentuais de substituição da areia e da brita por RPA. Observa-se uma tendência de redução progressiva da resistência à medida que aumenta o teor de substituição, coerente com o comportamento descrito na literatura para agregados reciclados de elevada porosidade.

Tabela 7 – Tensão de compressão dos corpos de prova (CPs)

CP	1°	2°	3°	4°	5°	6°	Média
T-14	20,55	22,42	22,69	22,17	22,32	21,61	21,96
A20-14	19,43	19,4	18,69	19,24	19,07	18,70	19,09
A40-14	16,83	16,79	16,82	17,65	16,04	17,70	16,97
A60-14	13,75	14,34	13,79	15,39	15,28	12,75	14,22
B20-14	15,97	15,33	16,96	14,90	14,95	16,17	15,71
B40-14	15,56	15,57	15,18	14,27	15,53	15,37	15,25
B60-14	12,78	12,86	13,74	12,34	12,72	11,99	12,74
T-28	24,48	25,48	25,07	25,96	25,21	25,59	25,30
A20-28	20,42	20,82	20,84	19,91	20,75	20,66	20,57
A40-28	18,70	18,88	18,65	19,02	19,01	18,58	18,81
A60-28	16,02	16,32	17,20	15,83	16,63	18,13	16,69
B20-28	16,20	16,41	15,36	15,39	16,64	16,46	16,08
B40-28	15,82	15,90	16,18	16,00	15,52	16,30	15,95
B60-28	13,59	14,60	14,11	13,47	13,50	13,08	13,72

Fonte: Próprios autores, 2025

Figura 7 – Corpo de prova A20 (a) e B60 (b) aos 28 dias

(a) (b)
Fonte: Próprios autores,2025

As rupturas apresentadas na Figura 7 evidenciam comportamentos distintos decorrentes das substituições parciais realizadas nos agregados. No corpo de prova com

substituição por brita reciclada (RPA) (Figura 7b), observa-se um padrão de ruptura mais frágil, caracterizado por fissuração longitudinal acentuada e destacamento superficial, comportamento associado à maior porosidade e microfissuras pré-existentes nos agregados provenientes de pavimento asfáltico. Já o corpo de prova com substituição por areia (Figura 7a) apresenta uma ruptura mais homogênea, com propagação de fissuras contínuas e menor deslocamento, indicando melhor interação pasta-agregado quando comparado ao uso da brita reciclada. Esse contraste entre os mecanismos de ruptura é coerente com a literatura, que demonstra que agregados reciclados de maior granulometria tendem a comprometer mais a zona de transição interfacial, reduzindo a capacidade resistente do compósito (Lima et al., 2023). Dessa forma, os modos de falha observados confirmam a influência direta do tipo de substituição no desempenho mecânico do concreto.

Tabela 8: Análise de variância

FV	GL	SQ	QM	F	P-Value
Doses de substituição de agregado	6	859,158457	143,193076	385,785	0,0000*
Tempo de cura	1	53,568171	53,568171	144,321	0,0000*
Doses x Tempo	6	19,665429	3,277571	8,830	0,0000*
Resíduo	70	25,982100	0,371173	-	-
Total	83	958,374157	-	-	-
CV (%) =	3,51				
Média Geral:	17,3607	Número de observações: 84			

*Significativo pelo teste de F a 5% de probabilidade. FV = Fontes de Variação, GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma dos Quadrados, QM = Quadrado Médio, CV = Coeficiente de Variação %

Fonte: Próprios autores,2025

Para a análise estatística, verificou-se que os dados atenderam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, não sendo necessária qualquer transformação prévia. A análise de variância referente ao esquema fatorial 7x2, composto por sete níveis de substituição dos agregados naturais por RPA e duas idades de cura (14 e 28 dias), é apresentada na Tabela 8. Nessa tabela estão dispostos os resultados do ensaio de resistência à compressão, evidenciando o comportamento de cada tratamento em função das diferentes doses de substituição e dos tempos de cura avaliados.

Após o processamento da análise estatística, as fontes de variação (FV) foram avaliadas individualmente para verificar se os valores de *p-value* eram inferiores a 0,05 (5%), indicando significância estatística. Conforme apresentado na Tabela 8, tanto o fator *Doses de substituição* quanto o fator *Tempo de cura* apresentaram *p-value* inferiores a 5%, rejeitando a hipótese nula (H_0) e confirmando que existe diferença significativa entre os níveis de substituição por RPA e entre as idades de cura avaliadas. Além disso, a interação Doses x Tempo também foi significativa, demonstrando que o efeito das doses de

substituição depende do tempo de cura, o que justifica o desdobramento posterior dessas combinações.

Diante da existência de diferenças significativas entre os tratamentos, tornou-se necessário aplicar um teste de comparação de médias para identificar quais tratamentos diferem estatisticamente entre si. Para isso, utilizou-se o Teste de Tukey, amplamente empregado por sua robustez e facilidade de interpretação. A Tabela 9 apresenta os resultados do teste, para a idade de 28 dias, no qual médias acompanhadas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, permitindo identificar os tratamentos com melhor desempenho em cada fator avaliado.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9, observa-se que o tratamento Testemunha (T) apresentou a maior média de resistência à compressão aos 28 dias de cura, sendo estatisticamente superior aos demais níveis de substituição.

Tabela 9: Resumo do Teste de Tukey para tipos de tratamento

Tratamentos	Média (MPa)	Resultado do teste
T-28	25,298	a
A20-28	20,567	b
A40-28	18,807	c
A60-28	16,688	d
B20-28	16,077	d
B40-28	15,953	d
B60-28	13,725	e

Fonte: Próprios autores, 2025

Por outro lado, o tratamento B60, correspondente à substituição de 60% da brita por RPA, apresentou a menor média, evidenciando a redução progressiva da resistência conforme o teor de resíduo aumenta. Esse comportamento está associado às características físicas do RPA, como maior porosidade, presença de ligante betuminoso e menor rigidez das partículas, fatores que comprometem o grau de compactação interna da matriz cimentícia e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência mecânica (Ferreira, 2022).

Tabela 10: Análise de Regressão

Material/Idade	FV	GL	SQ	QM	F	P-Value	R ²
Areia – 28 dias	Linear	1	228,362430	228,362430	558,844	0,0000*	94,39%
	Quadrática	1	10,244267	10,244267	25,070	0,0000*	98,62%
	Cúbica	1	3,326670	3,326670	8,141	0,0070*	100%
	Resíduo	40	16,345333	0,408633			
Brita – 28 dias	Linear	1	364,217363	364,217363	1044,272	0,0000*	76,64%
	Quadrática	1	73,360067	73,360067	210,336	0,0000*	92,08%
	Cúbica	1	37,654403	37,654403	107,961	0,0000*	100%
	Resíduo	40	13,95150	0,348776			

Fonte: Próprios autores, 2025

Para uma classificação matemática do impacto de cada tratamento na variável resistência a compressão do concreto aos 28 dias, foi verificado uma análise de regressão (Tabela 10), permitindo a estimativa das respostas e a identificação das tendências de redução de resistência conforme o aumento das doses. Para os dados referentes aos agregados miúdos (areia), a regressão

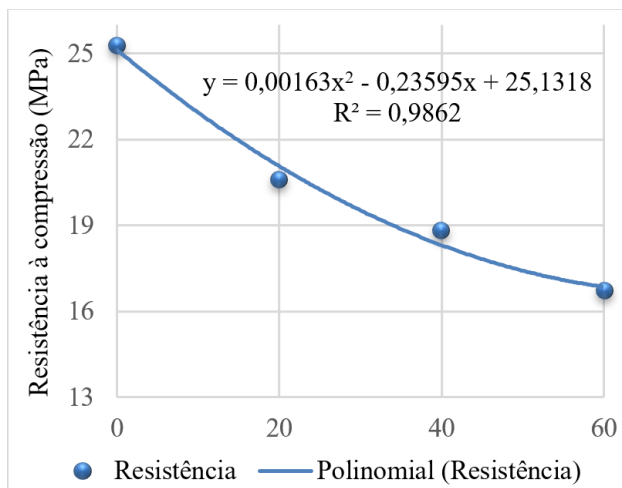
quadrática apresentou excelente ajuste aos 28 dias, com coeficiente de determinação $R^2 = 98,62\%$, descrevendo de forma mais fiel a curvatura observada no comportamento das médias.

Para os agregados graúdos (brita), verificou-se comportamento semelhante aos 28 dias, com o ajuste quadrático se mostrando a melhor escolha ($R^2 = 92,08\%$),

refletindo a tendência não linear da queda de resistência à medida que aumentam os teores de substituição. Em ambos os casos, os modelos cúbicos apresentaram *p-values* superiores a 5% e foram descartados por não contribuírem significativamente para a explicação da variabilidade dos dados.

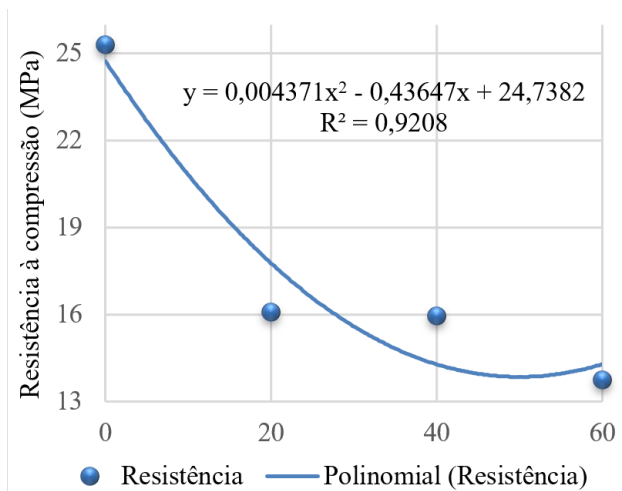
Assim, para interpretação dos resultados, foram adotados os modelos que apresentaram significância estatística e os maiores valores de R^2 , fornecendo curvas que representam adequadamente o comportamento da resistência frente às diferentes percentagens de RPA, conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9.

Figura 8: Regressão para Areia



Fonte: Próprios autores, 2025

Figura 9: Regressão para Brita



Fonte: Próprios autores, 2025

Os ensaios de resistência à compressão realizados aos 14 dias evidenciam que a substituição parcial dos agregados naturais por resíduos de pavimento asfáltico (RPA) influenciou significativamente o desempenho mecânico do concreto. O traço de referência, sem adição de RPA, apresentou média de 21,96 MPa, enquanto a substituição de 20% da areia resultou em resistência de 19,09 MPa, correspondendo a uma redução aproximada de 13 %. Já para 40% e 60% de substituição da areia, os valores encontrados foram de 16,97 MPa e 14,22 MPa, respectivamente, demonstrando uma queda progressiva da resistência à compressão. Esses resultados confirmam a tendência descrita por Ferreira et al. (2022), que destacam a viabilidade técnica de substituições em níveis reduzidos, especialmente até 20%, para aplicações em elementos de baixa responsabilidade estrutural. Rocha et al. (2021) também observaram que o aumento da absorção de água e a heterogeneidade do RPA comprometem a trabalhabilidade e a resistência do concreto, o que explica a redução mais acentuada nas substituições acima de 40%.

Nos concretos em que a brita foi substituída por RPA, o desempenho foi inferior ao observado para a areia. A substituição de 20% do agregado graúdo resultou em resistência de 15,72 MPa, representando uma queda de 28% em relação ao traço de referência. Para as substituições de 40% e 60%, os valores médios atingiram 15,25 MPa e 12,74 MPa, respectivamente. Esse comportamento é explicado pela maior porosidade e pela presença de ligante asfáltico residual no RPA, que reduzem a aderência da pasta cimentícia ao agregado, conforme observado por Yang et al. (2023). Ainda assim, estudos recentes, como o de Angiolini et al. (2024), ressaltam que a utilização de RPA pode ser interessante em elementos de menor exigência estrutural, contribuindo para a sustentabilidade do setor da construção civil.

Aos 28 dias, observou-se a mesma tendência de redução da resistência à compressão conforme o aumento do teor de substituição. O concreto de referência apresentou média de 25,30 MPa, enquanto as substituições de 20%, 40% e 60% da areia por RPA resultaram em 20,57

MPa, 18,81 MPa e 16,69 MPa, respectivamente. Esses valores representam reduções de aproximadamente 18,7%, 25,6% e 34% em relação à testemunha, confirmando que a incorporação do resíduo afeta o ganho de resistência mesmo após o período padrão de cura.

Nos traços em que a brita foi substituída, o comportamento foi semelhante: as resistências médias foram de 16,08 MPa, 15,95 MPa e 13,72 MPa para as substituições de 20%, 40% e 60%, correspondendo a reduções de 36,4%, 36,9% e 45,8% em relação ao concreto de referência. Esses resultados reforçam que, embora o processo de hidratação e cura proporcione acréscimo de resistência em todos os traços, o RPA limita o ganho mecânico devido à sua elevada porosidade, absorção de água e presença de ligante asfáltico residual, que prejudica a aderência entre a pasta cimentícia e o agregado.

Estudos como o de Basha et al. (2020) e Zhang et al. (2023) confirmam que concretos com agregados reciclados tendem a apresentar esse comportamento, com ganhos de resistência mais lentos e valores finais inferiores aos de concretos convencionais. Ainda assim, substituições até 20% mostraram desempenho satisfatório, sendo tecnicamente viáveis para aplicações não estruturais e alinhadas aos princípios da sustentabilidade, conforme salientado por Santos et al. (2023).

Ao comparar esses resultados com concretos confeccionados com outros tipos de agregados reciclados, observa-se que o comportamento do concreto com RPA é coerente com a tendência verificada na literatura. Em estudos com resíduos de construção e demolição (RCD), Cavalcante (2022) verificou que concretos com substituições de 50% e 100% apresentaram resistências médias aos 28 dias de 24,38 MPa e 18,31 MPa, frente a 27,55 MPa do concreto de referência, indicando perdas de cerca de 11,5% e 33,5%, respectivamente.

Frotté et al. (2021), de modo semelhante, observaram que concretos com agregados graúdos reciclados de demolição apresentaram reduções gradativas de resistência à medida que o teor de substituição aumentava, sendo mais expressivas acima de 50%. Já em

concretos com pó de brita ou pó de pedra, observou-se desempenho relativamente mais estável: Confea (2017) relatou que substituições parciais de areia por pó de pedra resultaram em concretos com resistências compatíveis ou ligeiramente superiores ao concreto de referência, devido à melhor distribuição granulométrica e empacotamento das partículas.

No caso da escória de ferro-níquel, Silva (2020) verificou que o uso do resíduo em concretos secos para artefatos pré-moldados apresentou desempenho mecânico satisfatório, mas inferior ao de concretos convencionais moldados com agregados naturais.

Essas comparações indicam que os concretos com RPA seguem o mesmo padrão dos produzidos com outros agregados reciclados — com reduções de resistência à compressão diretamente proporcionais ao aumento do teor de substituição. No entanto, quando comparado a resíduos como o pó de brita e a escória de ferro-níquel, o RPA tende a provocar perdas mais acentuadas, especialmente em teores elevados, devido à presença de ligante betuminoso e à maior heterogeneidade do material. Por outro lado, as perdas observadas são semelhantes às verificadas em concretos com RCD, situando-se entre 25% e 40% de redução, o que reforça a consistência dos resultados obtidos e confirma que substituições moderadas (até 20%) podem ser consideradas tecnicamente viáveis, desde que aplicadas em elementos de baixa exigência estrutural.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que as diferentes proporções de substituição do agregado miúdo por resíduo de pavimentação asfáltica (RPA) influenciaram significativamente a resistência à compressão do concreto ($p < 0,05$). O coeficiente de variação foi de 3,33%, indicando boa precisão experimental. O teste de Tukey revelou diferenças significativas entre todas as dosagens, evidenciando uma redução progressiva da resistência conforme o aumento do teor de substituição. Para os 28 dias de cura, por exemplo, o concreto de referência (0%) apresentou média de 25,30 MPa, enquanto as misturas com 20%, 40% e 60% em relação a areia atingiram resistências médias de 20,57 MPa,

18,81 MPa e 16,69 MPa, respectivamente, confirmando a relação inversa entre o aumento de RPA e a resistência à compressão do concreto.

Aos 28 dias, observou-se comportamento quadrático decrescente ($R^2 = 98,62 \%$), descrito pela equação $y = 0,001633x^2 - 0,2359x + 25,13$, demonstrando que substituições acima de 40% acentuam a perda de resistência. De acordo com estudos de Ferreira (2022) e Yang (2023), esse comportamento é atribuído à presença do ligante asfáltico residual no RPA, que compromete a aderência entre a pasta cimentícia e o agregado, além de reduzir a eficiência do processo de hidratação, limitando o ganho de resistência ao longo do tempo.

De modo geral, a substituição parcial da areia por resíduo de pavimentação asfáltica (RPA) até o limite de 20% apresentou desempenho satisfatório, situando-se dentro da faixa considerada tecnicamente viável para concretos de baixa responsabilidade estrutural, como apontado por Alves (2017) e confirmado por Yang et al. (2023). Essa proporção possibilita o aproveitamento do material reciclado sem comprometer de forma significativa a resistência mecânica do concreto, além de contribuir para a redução do consumo de recursos naturais e para o fortalecimento de práticas sustentáveis alinhadas aos princípios da economia circular na construção civil.

A análise estatística para os concretos com substituição de brita também apresentou diferença significativa entre as dosagens ($p < 0,05$), com CV de 3,46%, confirmando a consistência e precisão dos ensaios. O teste de Tukey aos 28 dias de cura indicou que o traço de referência obteve resistência média de 25,30 MPa, enquanto as substituições de 20%, 40% e 60% resultaram em médias de 16,08 MPa, 15,95 MPa e 13,73 MPa, respectivamente, evidenciando uma redução mais acentuada em comparação às misturas com areia.

Aos 28 dias, a equação ajustada foi $y = 0,004371x^2 - 0,4364x + 24,74$, com coeficiente de determinação (R^2) de 92,08%, evidenciando uma relação quadrática inversa entre o teor de resíduo de pavimentação asfáltica (RPA) e a resistência à compressão. Essa redução

pode ser atribuída à maior porosidade e à presença de ligante betuminoso no RPA, fatores que comprometem a aderência entre a pasta de cimento e o agregado graúdo, como também verificado por Rocha, Silva e Nascimento (2021) e Santos et al. (2023).

Esses resultados corroboram os achados de Basha et al. (2020) e Zhang et al. (2023), que também observaram comportamento semelhante em concretos produzidos com agregados reciclados, nos quais as reduções de resistência se mostraram diretamente proporcionais ao aumento do teor de substituição. Apesar das perdas registradas, verificou-se que substituições de até 20% de brita por resíduo de pavimentação asfáltica (RPA) permanecem tecnicamente viáveis para aplicações não estruturais, como calçadas, bases de pisos e elementos de enchimento, contribuindo para a diminuição do consumo de agregados naturais e para a mitigação dos impactos ambientais associados à extração de recursos minerais.

Ao comparar os dois tipos de substituição, verificou-se que o uso do resíduo de pavimentação asfáltica (RPA) como agregado miúdo apresentou desempenho superior ao observado quando o mesmo material foi empregado como agregado graúdo. Aos 28 dias, o concreto com 20% de RPA na fração miúda atingiu resistência média de 20,57 MPa, enquanto o concreto com igual proporção substituindo a brita obteve apenas 16,08 MPa. Esse comportamento reforça que a fração graúda do resíduo exerce influência negativa sobre a estrutura do concreto, em razão de sua maior heterogeneidade granulométrica e da presença de asfalto oxidado, fatores que dificultam a aderência e aumentam a absorção de água, conforme constatado nos estudos de Yang et al. (2023).

Dessa forma, as análises confirmam que a substituição de agregados por RPA é tecnicamente possível quando aplicada de forma controlada e limitada a proporções reduzidas. O teor de 20% apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e benefício ambiental, validando o uso de resíduos de pavimentação como uma alternativa sustentável e de viabilidade econômica para concretos de baixa exigência estrutural.

CONCLUSÃO

De modo geral, a partir dos resultados obtidos, verificou-se que a substituição parcial dos agregados naturais por resíduos de pavimentação asfáltica (RPA) influenciou de forma significativa o desempenho mecânico do concreto. Em todos os teores avaliados, constatou-se redução da resistência à compressão quando comparados ao concreto de referência, evidenciando que a presença do RPA altera a estrutura interna da matriz cimentícia devido à maior porosidade e à heterogeneidade do material residual.

Nesta pesquisa, especificamente, observou-se que o teor de 20% de substituição apresentou o melhor desempenho entre as composições com incorporação de RPA, tanto para a areia quanto para a brita, especialmente aos 28 dias, apresentando queda moderada de resistência quando comparado ao traço convencional. Já os teores de 40% e 60% resultaram em reduções mais acentuadas, comportamento atribuído ao aumento do índice de vazios e à menor capacidade de ligação entre pasta e agregado proporcionada pelo resíduo.

Para ambos os tipos de agregados avaliados, verificou-se que as diferenças entre os teores foram estatisticamente significativas pelo teste de Tukey, confirmando que o aumento da substituição exerce influência direta sobre o desempenho do concreto. Os resultados demonstram, ainda, que o uso de RPA se mostra adequado para aplicações em concretos de baixa responsabilidade estrutural, em que pequenas reduções de resistência não comprometem o desempenho global do elemento.

Logo, os resultados permitem concluir que o RPA possui potencial de reutilização na produção de concretos, desde que empregado em teores reduzidos e compatíveis com o nível de desempenho requerido. Dessa forma, a utilização do resíduo contribui para a sustentabilidade do setor da construção civil, reduzindo a disposição inadequada de materiais asfálticos e promovendo o reaproveitamento de resíduos provenientes da infraestrutura viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, R. L. M. Concreto produzido com resíduos de pavimento asfáltico: estudo das propriedades físicas e mecânicas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/40698/6/ConcretoProduzidoResiduos_Alves_2017.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.
2. ANGIOLINI, Moreno et al. Reclaimed asphalt pavement (RAP) in road construction: A critical review of global practices and environmental implications. *Infrastructures*, [S.l.], v. 9, n. 8, p. 128, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/9/8/128>. Acesso em: 08 abr. 2025.
3. ANGIOLINI, M. C. et al. Reclaimed asphalt pavement in cementitious materials: mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, v. 416, p. 134126, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134126
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655 – Concreto – preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2021 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2019 – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
9. ATHAYDE, P. B. Influência do uso de agregados reciclados nas propriedades dos concretos. 2018.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-B8FJQM>. Acesso em: 18 nov. 2025.
10. BASHA, E. A. et al. Mechanical properties of concrete with recycled aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, v. 12, p. e00372, 2020. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00372.
11. BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 307, dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf. Acesso em: 27 fev. 2025.
12. Catelli, A. (2015). Sustentabilidade ambiental e Amazônia. *Revista Uniesp*, 1(1), 22-24. Disponível em: https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20220915125654.pdf. Acesso em: 19 maio 2025.
13. CAVALCANTE, M. F. Estudo sobre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado. Universidade Federal de Alagoas, 2022. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/.../11600>.
14. CONFEA. Viabilidade técnica do uso de pó de pedra como substituto da areia natural. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, 2017. Disponível em: https://www.confear.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/102_vtdudpdppdc.pdf.
15. Correa, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na construção civil. 2009. Disponível em: http://www.academia.edu/download/54235791/Sustentabilidade_na_Construcao_Civil.pdf. Acesso em: 01 mar. 2025.
16. DIAS, L. T.; ROSA, L. R. da; MOURA, E. B. Construção civil: análise do comportamento da mão de obra e da produtividade na cidade de Santa Maria/RS. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 2, n. 5, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/316355835>. Acesso em: 13 mar. 2025.
17. FERREIRA, H. C. et al. Avaliação da substituição de agregados naturais por RPA no concreto convencional. *Revista Matéria*, v. 27, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/nMd9fp7YdT4YKfNv9xMb3yp>. Acesso em: 29 abr. 2025.
18. FERREIRA, A. P.; LIMA, T. S.; COSTA, J. E. Substituição parcial de agregados por RPA em concretos sustentáveis. *Revista Matéria*, v. 27, n. 2, p. e12703, 2022.
19. FROTTÉ, A. G. et al. Avaliação do uso de agregados reciclados de demolição em concretos estruturais. *Revista Matéria*, v. 26, n. 3, p. e11989, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.1278.
20. Gantois, M. & Lima, R. (2014) Aspectos fundamentais da competitividade na construção civil: qualidade, tempo e custo. *Revista de Engenharia e Construção*, vol. 22, p. 35-40.
21. HERNÁNDEZ, E. F. Efecto del agregado grueso triturado en las propiedades del concreto. *Nexo Revista Científica*, v. 34, n. 5, p. 56-63, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357475032>. Acesso em: 13 mar. 2025.
22. IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto. *Revista Concreto e Construções*. 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br>. Acesso em: 01 mar.2025.
23. Lima, R. C.; Andrade, L. A.; Santos, P. F. (2023). Mechanical behavior of concrete produced with recycled construction and demolition waste aggregates. *Journal of Building Engineering*, 75, 106750. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106750>
24. MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
25. MELO, D. B. de; NASCIMENTO, A. C. do; NASCIMENTO, M. S. do. Utilização de resíduos da construção civil na pavimentação: uma revisão sistemática. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 12, e37101215855, 2021. Disponível em:

- <<https://www.researchgate.net/publication/354602201>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
26. MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. Estatística básica. 9. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.
27. PARRALES ESPINALES, V. J.; CHILQUINGA LAGO, B.; GUERRA MERA, J. C. Propiedades físicas y mecánicas del concreto fabricado con agregado reciclado: una revisión literaria. *Respuestas*, v. 27, n. 1, p. 38-56, 2022. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/361611058>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
28. Pera, J. State of the art report – use of waste materials in constructions in Western Europe. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996.
29. Póvoas, M. (2015). A sustentabilidade e suas dimensões. *Revista da ESMESC*, 1(1), 49-58. Disponível em: <http://revista.esmesc.org.br/re/article/download/187/161/367>.
30. ROCHA, R. C. et al. Avaliação dos resíduos de construção e demolição no dimensionamento de camada reforço de pavimentos flexíveis. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, e58310917691, 2021. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/353498410>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
31. ROCHA, V. M.; SILVA, D. P.; NASCIMENTO, R. L. Avaliação de concretos com resíduos asfálticos reciclados. *Revista Engenharia Civil*, v. 31, p. 45–58, 2021.
32. SANTOS, A. C.; MOURA, R. P.; LIMA, V. A. Utilização de RAP em Camadas de Revestimento Asfáltico. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 10, n. 24, p. 161-175, 2023. Disponível em: <https://revista.ecogestaobrasil.net/v10n24/v10n24a11.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.
33. Santos, L. et al. (2020). Sustentabilidade na construção civil: desafios e soluções para a economia circular. *Jornal de Engenharia Ambiental*, vol.15, p. 101-112.
34. SANTOS, E. R. et al. Sustentabilidade na produção de concretos com resíduos de pavimentação asfáltica. *Revista Brasileira de Engenharia Sustentável*, v. 5, n. 1, p. 33–44, 2023.
35. Schorr, J. S., Rogério, M. S., & Cenci, D. R. (2015). Crise ambiental e desenvolvimento sustentável: postulados de Enrique Leff. *Anais do Mercosul*, 1(1), 1-10. Disponível em: <https://home.unicruz.edu.br/mercosul/pagina/anais/2015/1%20%20ARTIGOS/CRISE%20AMBIETAL%20E%20DESENVOLVIMENTO%20SUSTENTAVEL%20POSTULADOS%20DE%20ENRIQUE%20LEFF.PDF>
36. SILVA, A. L. M. da; MEDEIROS, R. L. B.; SANTOS, J. C. M. dos. Modelagem estatística de misturas de argamassa com areia normal brasileira. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/352304050>. Acesso em: 13 mar. 2025.
37. SILVA, V. P. Uso de escória de ferro-níquel na fabricação de artefatos pré-moldados de concreto seco. *Instituto Federal de Goiás*, 2020. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/384/1/tcc_Vitor%20Pereira%20Silva.pdf.
38. SOLÍS, R. G.; MORENO, E. I.; ARJONA, E. Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *Revista ALCONPAT*, v. 2, n. 1, p. 21-28, 2012. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/292994845>>. Acesso em: 13 mar. 2025.
39. Souza, Paulo Alysson Brillhante Faheima de. Estudo do comportamento mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

-
40. SOUZA, R. F. et al. Influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 63., 2021, São Paulo. Anais... São Paulo: IBRACON, 2021.
41. TRIOLA, Mário F. *Introdução à Estatística*. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
42. Tutikian, B. F.; Helene, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. 2011.
43. WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KULAKOWSKI, Marlova Piva. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. *Revista Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 7–22, abr./jun. 2011.
44. YANG, Wenjie et al. Feasibility study of using reclaimed asphalt pavement as aggregates in structural concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 1–10, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-024-00101-y>. Acesso em: 08 abr. 2025.
45. YANG, L. et al. Influence of asphalt residues on cementitious bonding in recycled asphalt concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 170, p. 107140, 2023. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107140.
46. YU, C.; LI, Z.; GAO, Z.; WANG, R.; LIU, J. Influence of distribution modulus on the compressive strength of UHPC-containing coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2022, p. 1–12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/7615616>. Acesso em: 18 nov. 2025.
47. ZHANG, X. et al. Performance of recycled aggregate concrete under different curing conditions. *Journal of Building Engineering*, v. 77, p. 107509, 2023. DOI: 10.1016/j.job.2023.107509